بررسی آزمایشگاهی مشخصات جریان در دریچه‌های کشویی با لبه استوانه‌ای و نیم استوانه‌ای★

محمد نورالهی[۱] علی‌نقی ضیایی[۲] علی‌اصغر بهشتی[۳]

چکیده دریچه‌های کشویی ازجمله پرکاربردترین سازه‌ها برای کنترل سطح آب و دبی جریان در کانال‌های روباز هستند. با این وجود دریچه‌های کشویی لبه‌تیز، ضریب فشردگی حدود ۰/٦ دارند که ظرفیت دبی آنها را محدود می‌نماید. بررسی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی دریچه تلفیقی از دریچهٔ کشویی و دریچهٔ طبلی در این پژوهش انجام شده‌است. نتایج نشان داد که در دریچهٔ کشویی با لبهٔ استوانه‌ای ضریب فشردگی تا نزدیک ۱/۰ افزایش می‌یابد، این امر به دلیل تأثیر استوانه بر خطوط جریان است. هم‌چنین در شرایط یکسان آزمایش، جریان در پایین‌دست دریچهٔ کشویی استوانه‌ای با عمق پایاب بیشتری نسبت به دریچهٔ لبه‌تیز در حالت آزاد باقی می‌ماند. به‌طوری‌که برای دامنهٔ نسبت بار آبی بالادست به بازشدگی دریچه از ٤ تا ۱۸، نسبت عمق پایاب ماکزیمم به بازشدگی دریچه به‌ترتیب برای دریچهٔ استوانه‌ای با قطر ٦۳ میلی‌متر تا ۱٦ درصد و برای دریچه‌های استوانه‌ای با قطرهای ۹۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ میلی‌متر تا ۲۲ درصد نسبت به دریچهٔ کشویی لبه‌تیز افزایش می‌یابد. این قابلیت یک مزیت مهم برای این‌گونه دریچه‌ها محسوب می‌شود چرا که با جلوگیری از استغراق جریان باعث جلوگیری از افزایش بار آبی بالادست می‌شود و امکان سرریز شدن در قسمت بالادست دریچه کاهش می‌یابد که این امر خود باعث جلوگیری از اتلاف آب می‌شود. علاوه بر این روابطی برای تشخیص شرایط جریان آزاد و مستغرق در دریچه‌های کشویی استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای با دقت بالا ارائه شد.

واژه‌های کلیدی دریچهٔ کشویی لبه‌تیز، دریچهٔ طبلی، ضریب فشردگی.

Experimental Study of Flow Characteristics in Sluice Gates with Cylindrical Edges and Half-Cylindrical Edges

M. Nourollahi A.N. Ziaei A.A. Beheshti

Abstract *Sluice gates are widely used for water level control and flow measurement in open channels. The sharp edge of sluice gates causes low contraction coefficient (Cc) and limited flow rate capacity. Here, the performance of a new sluice gate which is consisted of a sharp-edged sluice gate and a drum gate (a sluice gate with a cylindrical end) is experimentally evaluated. Since the streamline leaves the gate more smoothly, Cc is considerably increased. i.e., from 0.6 in sharp edged gates reached to 1.0 in cylindrical-edged gates. Moreover for a given upstream depth, this gate was less likely to become submerged compared to an equivalent sharp edged sluice gate. For upstream water depth of gate to opening of gate(H0/W) in range 4-18,tailwater depth to opening of gate(yt/W) increased up to 22 percent for drum diameter of 63, 90, 125 and 200 mm. This feature obviates the need to increase the free board height in the upstream channel and refrains from upstream overflow whenever unexpected downstream tail water rise occurs. Moreover, distinguishing condition curves for these gates were obtained.*

Key Words Contraction Coefficient, Drum Gate, Sharp-Edge Sluice Gate.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹٤/۲/٤ تاریخ پذیرش آن ۹۵/۳/۳۱ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲)نویسندهٔ مسئول: دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد.

Email: An_ziaei@yahoo.com

(۳) استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد.

مقدمه

دریچه‌ها از پرکاربردترین سازه‌های آبی در شبکه‌های توزیع هستند که به‌منظور ارسال و تحویل آب به نقاط ازپیش تعیین‌شده و یا به‌منظور سازهٔ کنترل جریان دبی و یا سطح آب استفاده می‌شوند. ازجملهٔ پرکاربردترین دریچه‌ها می‌توان به دریچه‌های کشویی لبه‌تیز و دریچه‌های قطاعی اشاره نمود که باتوجه به شرایط حاکم در محل و هم‌چنین هدف مورد نظر می‌توان از آنها استفاده نمود. تعیین روابط حاکم بر این سازه‌ها می‌تواند باعث بهبود عملکرد سیستم‌های شبکهٔ مجاری روباز توزیع آب شود و درنتیجه مانع از اتلاف آب گردد.

جریان عبوری از دریچه باتوجه به عمق پایاب می‌تواند آزاد و یا مستغرق باشد و ضریب دبی نیز برای این دوحالت متفاوت است. میزان دبی عبوری از دریچه فقط تحت تأثیر بار آبی بالادست نیست [2,1]. به‌منظور تعیین دقیق دبی عبوری از دریچه می‌بایست پارامترهای تأثیرگذار و هم‌چنین شرایط تغییر جریان از آزاد به مستغرق شناخته شود. ازجمله مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر مشخصات جریان عبوری در دریچه‌ها، ضریب فشردگی است. ضریب فشردگی بر ضریب دبی و درنتیجه بر میزان دبی عبوری از دریچه و هم‌چنین میزان افت جریان تأثیر به‌سزایی دارد [3]. ضریب فشردگی برای دریچه‌های کشویی لبه‌تیز به‌طور گسترده توسط محققان مختلف مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته‌است. ضریب فشردگی تابعی از میزان بازشدگی دریچه، بار آبی بالادست دریچه و شکل دریچه است. برای دریچهٔ کشویی لبه‌تیز این مقدار توسط هنری ۰/٦ و توسط هندرسون، راجاراتنام و سوبرامانیا ۰/٦۱ توصیه شده‌است [2,1]. هندرسون [1] دامنهٔ تغییر این ضریب را از ۰/٦۱ تا ۱ برای دریچه‌های قطاعی باتوجه به زاویهٔ تشکیل‌شده بین انتهای دریچه و جریان اعلام کرد که مقدار ۱ مربوط به زاویهٔ صفر می‌باشد. مونت [4] دامنهٔ ۰/٦۰ تا ۰/۷۵ را برای ضریب فشردگی در دریچهٔ کشویی باتوجه به زاویهٔ خطوط جریان با افق پیشنهاد نمود. تل [5] ضخامت مقطع فشردگی در دریچه‌های قطاعی را در ابتدای استغراق به‌دلیل فشار آب وارد بر آن مقطع دانست. بلاد و همکارانش [3] به مطالعهٔ ضریب فشردگی دریچهٔ کشویی در بستر صاف برای دو جریان آزاد و مستغرق بر پایهٔ قوانین مومنتم پرداختند. آنها دریافتند ضریب فشردگی با میزان بازشدگی دریچه و نسبت استغراق، مخصوصاً در بازشدگی‌های زیاد، متغیر است. هم‌چنین در بازشدگی‌های کم، مقدار ضریب فشردگی را در حالات آزاد و مستغرق نزدیک به‌هم یافتند درحالی‌که در بازشدگی‌های زیاد عکس این حالت گزارش شده‌است. محمدی و بیرامی [٦] به ارائهٔ یک معادلهٔ نیمه‌تئوری برای تخمین ضریب فشردگی (C_c) دریچهٔ کشویی پرداختند. باتوجه به معادلهٔ انرژی بین مقاطع قبل و بعد از دریچه و پدیدهٔ افزایش هد فشار در اثر پروفیل سطح آب پس از دریچه، معادله‌ای برای ضریب دبی ارائه نمودند. برای واسنجی معادلهٔ پیشنهادی از داده‌های آزمایشگاهی استفاده‌شد که خطای مطلق متوسط را تا کمتر از ۳ درصد کاهش داده‌است. میانگین خطای مطلق تخمین ضریب فشردگی نیز برابر ۲/۹٤ درصد و میانگین خطای مطلق تخمین دبی جریان در دریچهٔ کشویی برای داده‌های آزمایشگاهی برابر ۲/٦۳ و برای داده‌های میدانی ۱/۹۲ درصد بوده‌است.

باتوجه به تفکیک روش‌های تعیین میزان دبی عبوری از دریچه‌ها در دو حالت آزاد و مستغرق، تشخیص شرایط جریان ازنظر آزاد یا مستغرق بودن و یا حالت بینابین، حائز اهمیت است. بدین‌منظور منحنی تشخیص شرایط جریان، ابزاری مفید و کاربردی برای تشخیص شرایط جریان است. زمانی که پرش هیدرولیکی بعد از دریچه بلافاصله بعد از آن تشکیل می‌شود، شرایط جریان آزاد است. با افزایش عمق پایاب، پرش هیدرولیکی به‌طرف دریچه حرکت می‌کند

و زمانی که بار آبی بالادست دریچه متأثر از عمق پایاب گردد، شرایط مستغرق ایجاد می‌گردد. بیشترین مقدار عمق پایاب متناظر با یک بار آبی بالادست که باعث ایجاد جریان آزاد می‌شود نمایانگر مؤلفه‌های منحنی تشخیص جریان است.

بس [7] معادله‌ای برای تشخیص جریان ازنظر آزاد و یا مستغرق بودن در پشت دریچهٔ کشویی لبه‌تیز با درنظر گرفتن معادلهٔ عمق مزدوج پرش و ضریب فشردگی بعد از دریچه ارائه نمود. وی اعلام کرد که اگر عمق اولیهٔ پرش در ناحیهٔ فشردگی درنظر گرفته‌شود، زمانی جریان پس از دریچه آزاد خواهد بود که عمق ثانویهٔ پرش از مقداری که از معادلهٔ عمق مزدوج به‌دست می‌آید بیشتر نشود. وی معادلهٔ (۱) را برای بیان شرایط جریان آزاد ارائه نمود.

$$\frac{Y_2}{w} < \frac{C_c}{2}\left[\sqrt{\left(1 + 16\left(\frac{H_0}{C_c w} - 1\right)\right)} - 1\right] \qquad (۱)$$

که در آن H_0 بارآبی بالادست دریچه، Y_2 عمق ثانویهٔ پرش بعد از دریچه، w بازشدگی دریچه و C_c ضریب فشردگی بعد از دریچه است. وی در نهایت با درنظر گرفتن ضریب فشردگی برابر با ۰/۶۱۱، نموداری را به‌عنوان منحنی تشخیص جریان برای دریچهٔ کشویی ترسیم نمود.

سوامی [8] معادله‌ای برای تعیین ضریب دبی بااستفاده از منحنی‌های ترسیم‌شده ارائه نمود. این منحنی‌ها بیان‌کنندهٔ رابطه بین ضریب دبی و نسبت عمق بالادست دریچه به بازشدگی دریچه هستند. باتوجه به این‌که نمودارهای ارائه‌شده تا آن زمان قابل‌استفاده برای هر روش تحلیلی و عددی برای کنترل جریان و تعیین پروفیل سطح آب نبودند، وی تلاش نمود تا روابط ریاضی برای نمودارهای گرافیکی موجود پیشنهاد دهد. وی معادله‌ای با دقت بالا برای تعیین ضریب دبی برای جریان آزاد و مستغرق به‌همراه معیاری برای تشخیص آزاد و یا مستغرق بودن جریان تشکیل‌شده بعد از دریچه ارائه نمود. برای شرایط مستغرق، ضریب دبی زمانی که بارآبی بالادست برابر با عمق پایاب باشد، برابر با صفر است. افزایش در بار آبی بالادست به مقداری که از عمق پایاب بیشتر باشد باعث می‌شود که ضریب دبی از صفر بیشتر باشد. درنهایت معادله‌های (۲) و (۳) را به ترتیب برای تشخیص جریان مستغرق و آزاد ارائه نمود.

$$Y_t < H_0 < \frac{0}{81Y_t\left(\frac{Y_t}{w}\right)^{\frac{0}{72}}} \qquad (۲)$$

$$H_0 \geq 0/81Y_t\left(\frac{Y_t}{w}\right)^{0/72} \qquad (۳)$$

که در آنها Y_t عمق پایاب است. معادلهٔ (۳) از رسم مقادیر $\frac{Y_t}{w}$ و $\frac{H_{0max}}{w}$ در محورهای لگاریتمی به‌وسیلهٔ رگرسیون به‌دست آمده‌است.

ین و همکاران[9] به تحقیق بر روی مشخصه‌های مختلف دریچه‌های کشویی قائم در کانال مستطیلی با بستر هموار و افقی پرداختند و معادلاتی برای ضریب دبی، اعماق مستغرق، بیشترین بازشدگی مجاز دریچه و شرایط تشخیص جریان آزاد از جریان مستغرق بعد از دریچه استخراج کردند و معادلهٔ (٤) را برای تشخیص آزاد و یا مستغرق بودن شرایط جریان ارائه کردند و دریافتند که خطای معادلهٔ پیشنهادی زمانی که $\frac{H_0}{b}$ بیشتر از ۳ باشد، بین ۲/۵- تا ۳/۲+ خواهد بود.

$$\frac{(Y_{t_{max}}}{C_c b} = 0/5\left(\sqrt{1 + \frac{16}{\frac{C_c b}{H_0}\left(1 + \frac{C_c b}{H_0}\right)}} \;\; - 1\right) \qquad (٤)$$

که در آن b عرض کانال و $Y_{t_{max}}$ حداکثر عمق پایاب مربوط به زمانی است که جریان آزاد پس از دریچه تشکیل شود. آنها همچنین دریافتند که برای $\frac{H_0}{w}$ کمتر از ۱/۸ جریان به‌راحتی امکان استغراق را دارد و کنترل دبی جریان امکان‌پذیر نیست.

لین و همکاران [10] برای تعیین حداکثر عمق پایاب که تمایز بین حالت پرش مستغرق و آزاد

تشکیل‌شده بعد دریچه را معلوم می‌کند معادله‌ای تئوری ارائه نمودند. آنها تأثیر ضریب فشردگی را بر شرایط تشخیص جریان با توسعهٔ رابطهٔ پرش هیدرولیکی بررسی کردند و معادلهٔ ارائه‌شده را برای دو نوع دریچه استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که تغییر در نوع دریچه باعث تغییر در ضریب فشردگی و شرایط تشخیص جریان آزاد و مستغرق بعد از آن می‌شود. هم‌چنین نتایج آنان نشان داد که برای عمق آب بالادست ثابت، دریچه‌ای که دارای ضریب فشردگی بیشتری باشد، درمقایسه با دریچهٔ کشویی لبه‌تیز کمتر در معرض استغراق قرار می‌گیرد. معادلهٔ ارائه‌شدهٔ آنان همانند معادلهٔ (٤) بوده‌است.

راجاراتنام و سوبرامانیا [2] با درنظر داشتن ضریب فشردگی ۰/٦۱ برای دریچهٔ کشویی لبه‌تیز معادلهٔ (۵) را برای تشخیص شرایط جریان ارائه کردند.

$$\frac{(Y_t)}{w} = \frac{C_d}{2}\left(\sqrt{1 + 16\frac{\left(\frac{H_0}{w}\right) - 0/61}{C_d}} - 1\right) \qquad (۵)$$

C_d ضریب دبی است که برای محاسبهٔ آن نیز از معادلهٔ (٦) استفاده می‌شود.

$$C_d = \frac{0/61}{\sqrt{1 - 0/372\left(\frac{H_0}{w}\right)^{-2}}} \qquad (٦)$$

وال و کلمنس [11] از معادلهٔ مومنتم برای تشخیص شرایط جریان کمک گرفتند. آنها نیروی مومنتم شرایط آزاد دریچه را با نیروی مومنتم مرتبط با عمق پایاب جریان مورد مقایسه قرار دادند. اگر مومنتم متعلق به پایین‌دست بزرگ‌تر از مومنتم بالادست جریان باشد، شرایط مستغرق پیش می‌آید، در غیر این صورت شرایط آزاد درنظر گرفته‌می‌شود. با این حال، بویالسکی [12] و وال و کلمنس [11] هیچ‌کدام منحنی‌ای برای تشخیص شرایط جریان ارائه ننمودند.

بیژن خان و همکاران [13] ابتدا به مقایسهٔ روش‌های انرژی–مومنتم که توسط کلمنس و همکارانش [14] ارائه شد و روش بی‌بعد دبی–اشل که توسط فرو (۲۰۰۰) ارائه شد پرداختند. آنها با نرمال‌سازی و بی‌بعدسازی معادلات روش انرژی–مومنتم، دو روش بی‌بعد دبی–اشل و روش انرژی–مومنتم را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند روش انرژی–مومنتم قادر به محاسبهٔ دبی حتی در حالت انتقالی بین شرایط آزاد و مستغرق است در حالی‌که روش بی‌بعد فرو دارای این مزیت نیست. آنها سپس بااستفاده از روش انرژی–مومنتم و برابر دانستن انرژی آبی بالادست دریچه در معادلات آزاد و مستغرق، در حالت انتقالی شرایط جریان بعد از دریچه بین آزاد و مستغرق، معادله‌ای برای تشخیص شرایط جریان ارائه نمودند. از دیگر مزایای معادلهٔ ارائه‌شده توسط آنها می‌توان به این امر اشاره کرد که عرض کانال در محل دریچه و پایین‌دست آن می‌تواند برابر نباشد.

شرایط جریان آزاد، زمانی که پرش هیدرولیکی تشکیل‌شده بعد از دریچه در فاصله‌ای از دریچه قرار دارد، برای تعیین دبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با افزایش عمق پایاب، شرایط جریان به حالت مستغرق نزدیک می‌شود. می‌توان فرض نمود که دقیقاً در آستانهٔ تبدیل شرایط جریان از آزاد به مستغرق، معادله‌های موجود برای تعیین دبی برای هر دو حالت باید دارای جواب یکسانی باشند. باتوجه به فرض بیان‌شده، می‌توان از آن برای تعیین روابطی برای تشخیص شرایط جریان استفاده نمود. بر پایهٔ این مفهوم، با برابر قرار دادن روابط تعیین دبی ارائه‌شده توسط فرو [15] و انصار [16] برای شرایط جریان آزاد و مستغرق، معادلهٔ (۷) به‌عنوان تشخیص شرایط جریان به‌دست آمد:

$$\frac{Y_t}{w} = \frac{H_0}{w} - \left(\frac{0.83}{1.055}\right)^{\frac{1}{0.3344}}\left(\frac{H_0}{w}\right)^{\frac{0.378}{0.3344}} \qquad (۷)$$

حبیب زاده و همکاران [17]، به معرفی فاکتور افت انرژی در دریچه‌های کشویی لبه‌تیز پرداختند. آنها با حل هم‌زمان دو معادلهٔ انرژی و مومنتم برای شرایط مستغرق دریافتند که فاکتور افت انرژی تأثیر به‌سزایی در تخمین میزان جریان عبوری از دریچه دارد و برای دست یافتن

به میزان دقیق آن نباید فاکتور افت انرژی را از روابط حذف نمود. آنها هم‌چنین معادلهٔ (۸) را برای تشخیص شرایط جریان با درنظر داشتن فاکتور افت انرژی ارائه نمودند.

$$\frac{(Y_t)_{max}}{b} = 0/5C_c\left(\sqrt{1+16(\beta-1)/(1+k-\frac{1}{\beta^2})} \;\; -1\right) \qquad (۸)$$

که در آن مقادیر β نسبت بار آبی بالادست دریچه به عمق آب در مقطع فشردگی بعد از دریچه، k فاکتور افت انرژی که با توجه به تحقیقات راجاراتنام و سوبرامانیا برابر با ۰/۶۱۱ درنظر گرفته می‌شود.

دریچه‌های موردنظر در این تحقیق همانند دریچهٔ کشویی باز و بسته می‌شود و از نظرساختار، استوانه‌ای در لبهٔ دریچه کار شده‌است. بدین منظور از دو شکل مختلف در انتهای دریچه استفاده شده‌است که شامل یک نیم‌استوانه در قسمت بالادست دریچه در اندازه‌های مختلف و یک استوانهٔ کامل در انتهای دریچه در اندازه-های مختلف است. علت استفاده از چنین ترکیبی از دو دریچهٔ ذکرشده، دست‌یافتن به دریچه‌ای است که از نظر ساخت ساده و ازنظر هیدرولیکی دارای عملکرد بالایی نسبت به مدل‌های رایج باشد. باید توجه داشت که دریچهٔ مورداستفاده در این پژوهش دارای شکل و ساختاری متفاوت است و درگذشته تحقیقات گسترده-ای فقط برروی دریچه‌های رایج کشویی لبه‌تیز و قطاعی انجام شده‌است و روابط زیادی توسط محققان در زمینهٔ ضریب فشردگی، کنترل جریان و معادلاتی برای تخمین دبی عبوری در آنها ارائه شده‌است.

در این تحقیق سعی شده تا با تلفیق هندسهٔ دودریچهٔ کشویی لبه‌تیز و دریچهٔ طبلی، دریچه‌ای کشویی با لبهٔ استوانه‌ای که دارای عملکرد مطلوب‌تری است، معرفی شود. هم‌چنین بررسی تأثیر کمی استوانه‌های به‌کاررفته در لبهٔ دریچه برروی رژیم جریان از قبیل ضریب فشردگی و ضریب دبی و منحنی تشخیص شرایط جریان از اهداف پژوهش است.

مواد و روش‌ها

روش انجام آزمایش

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد در فلوم مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ٤٦ سانتی‌متر انجام گرفت. آزمایش‌ها برای حالت زیرگذری جریان با تراز کف برابر در بالادست و پایین‌دست دریچه و مقاطع مستطیلی‌شکل صورت گرفت. برای تأمین جریان در فلوم از پمپی با حداکثر دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه استفاده‌شد. برای ساخت دریچه از یک صفحهٔ پلکسی گلاس با ضخامت ۸ میلی‌متر و عرضی برابر با عرض فلوم و برای استوانه و نیم‌استوانه‌های به‌کاررفته در انتهای دریچه از لوله‌های پی‌وی‌سی استفاده شده‌است. در این پژوهش در مجموع از نه دریچه که شامل چهار دریچهٔ استوانه‌ای کامل و چهار دریچهٔ نیم‌استوانه با قطرهای ٦۳، ۹۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ میلی‌متر و یک دریچهٔ لبه‌تیز بود، استفاده گردید. دریچه‌های موردنظر در این پژوهش در فاصلهٔ ۱/۲ متر از ابتدای فلوم نصب شد و هم‌چنین از صفحات آرام‌کنندهٔ جریان در ورودی جریان به فلوم نیز استفاده شد. از یک دریچهٔ خوابان در انتهای فلوم به‌منظور تنظیم عمق پایاب استفاده شده‌است. با تنظیم عمق پایاب مکان پرش هیدرولیکی در ناحیه‌ای بلافاصله پس از دریچه‌ها کنترل شد و می‌توان شرایط جریان آزاد و مستغرق را تعیین نمود. پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در آزمایش‌ها عبارتند از، دبی جریان، پروفیل سطح آب در بالادست دریچه، عمق جریان در مقطع فشردگی پس از دریچه، عمق اولیه و ثانویهٔ پرش تشکیل‌شده در شرایط جریان آزاد و عمق پایاب.

اندازه‌گیری میزان دبی جریان ورودی بااستفاده از سرریز مستطیلی واسنجی‌شده صورت گرفت و بااستفاده از دستگاه تنظیم فرکان ابتدا میزان دبی برای هر هرتز به‌دست آمد و سپس برای هر دریچه مورد استفاده قرار گرفت. برای قرائت عمق جریان، از یک عمق‌سنج

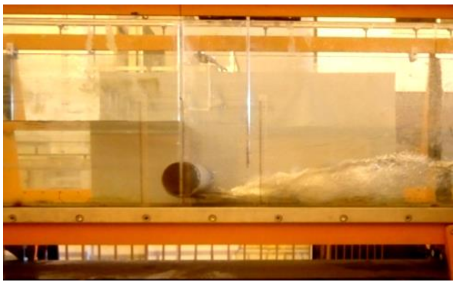
به‌صورت ریلی و با دقت$\pm 0/1$ میلی‌متر استفاده گردید. آزمایش‌ها در دو بازشدگی مختلف برای دریچه‌ها انجام شد. دامنهٔ تغییرات دبی و متناسب با آن ارتفاع آب در مخزن برای آزمایش‌های انجام‌شده به شرح جدول شمارهٔ (۱) است. که در جدول شمارهٔ (۱)، Q میزان دبی عبوری برحسب لیتر و D قطر استوانهٔ به‌کاررفته در دریچه‌های کشویی استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای است.

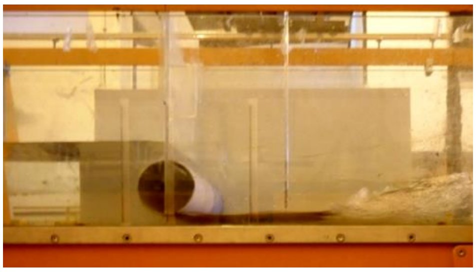
برای هر آزمایش ابتدا بازشدگی دریچه تنظیم شد و دریچهٔ خوابان در انتهای فلوم به‌طور کامل خوابانده‌شد تا تأثیری بر جریان نداشته باشد. سپس پمپ راه‌اندازی شد و پس از تثبیت و توسعه‌یافتگی جریان، اقدام به برداشت پروفیل سطح بالادست دریچه و عمق آب در مقطع فشردگی پس از دریچه شد. پس از آن دریچهٔ خوابان به‌نحوی تنظیم شد که پرش هیدرولیکی بلافاصله بعد از دریچه تشکیل شود و عمق اولیهٔ پرش هیدرولیکی برابر با عمق آب در مقطع فشردگی بعد از دریچه باشد و تأثیری بر بار آبی بالادست دریچه نداشته باشد. درنهایت پس از گذشت زمانی که موجب تثبیت جریان شد، برداشت داده‌های مربوط به پرش هیدرولیکی و عمق پایاب صورت گرفت. شکل‌های (۱) و (۲) نمایی از دریچه‌های نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل در حال آزمایش را نشان می‌دهد.

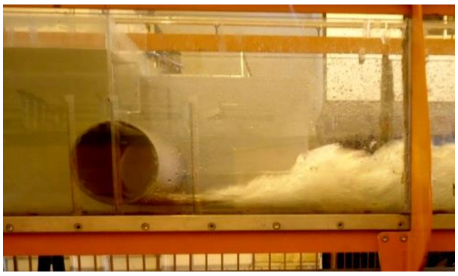
جدول ۱ محدودهٔ تغییرات کلیه پارامترها در آزمایش‌های مختلف

نوع دریچه	D(mm)	Y_t(cm)	H_0(cm)	Q(lit/s)	W(cm)
کشویی با لبهٔ نیم‌استوانه‌ای	63 -200	9-23	7/3-45	6-25	2/5-3/5
کشویی با لبهٔ استوانهٔ کامل	63 -200	7/7-24/5	6/8-45	6/7-25	2/5-3/5
کشویی لبه‌تیز	-	3-20/5	7/4-45	4/5-20	2/5-3/5

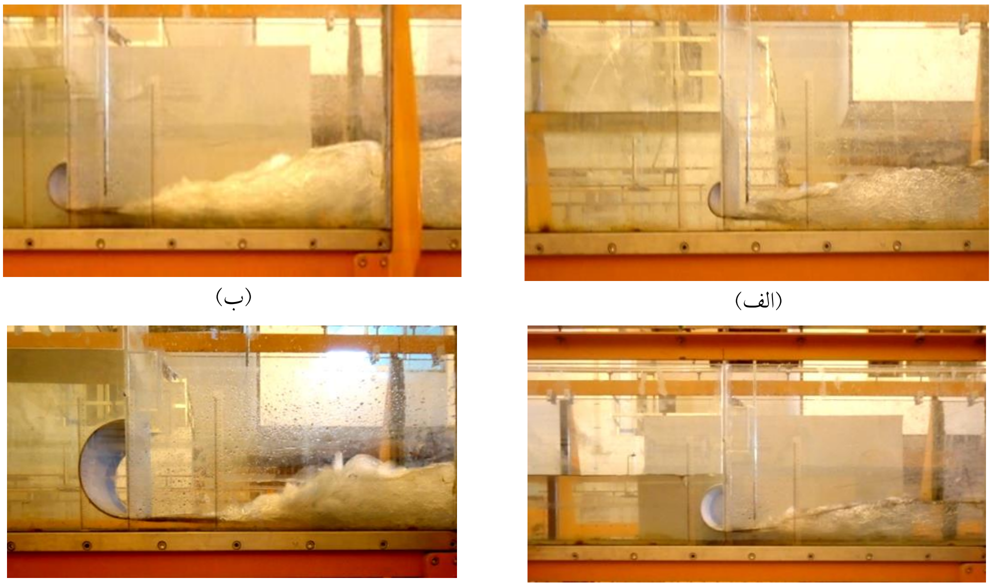

(الف)


(ب)


(پ)


(ت)

شکل ۱ نمایی از دریچه‌های استوانه‌ای کامل در حال آزمایش، شکل‌های (الف) و (ب) و (پ) و (ت) به‌ترتیب دریچهٔ کشویی استونه‌ای کامل با قطر ٦۳ و ۹۰و ۱۲۵و ۲۰۰ میلی‌متر



شکل ۲ نمایی از دریچه‌های نیم‌استوانه‌ای در حال آزمایش، شکل‌های(الف) و (ب) و (پ) و (ت) به‌ترتیب دریچهٔ کشویی نیم‌استونه‌ای با قطر ٦٣ و ۹۰و ۱۲۵و ۲۰۰ میلی‌متر

آنالیز ابعادی

باتوجه به بررسی هر پدیدهٔ فیزیکی می‌توان تحلیل ابعادی را باتوجه به پارامترهای مهم در آن پدیده بررسی و تحلیل نمود. درنتیجه خواهیم داشت:

$$F(\rho, \mu, H_0, y_1, y_t, V_1, g, D, b, w, C.g) = 0 \qquad (۹)$$

که در این رابطه، جرم حجمی سیال (ρ)، لزجت دینامیکی سیال(μ)، عمق جریان بالادست دریچه (H_0)، عمق آب در مقطع فشردگی (y_1)، عمق آب پایاب (y_t)، سرعت جریان (سرعت جریان در مقطع تنگ‌شدگی) (V_1)، شتاب ثقل (g)، قطر استوانهٔ لبهٔ دریچه(D)، عرض کانال (b)، بازشدگی دریچهٔ کشویی (w)، فرم هندسی مقطع آبراهه $(C.G)$ می‌باشد. باتوجه به این موضوع که عرض آبراهه (b) و فرم هندسی مقطع آبراهۀ مستطیلی $(C.G)$، در تمام آزمایش‌ها ثابت خواهد بود، درنتیجه از تأثیر این پارامترها به‌عنوان پارامترهای ثابت آزمایشگاهی می‌توان صرف‌نظر نمود.

بنابراین رابطهٔ تابعی(۹) را می‌توان به‌صورت زیر تغییر داد:

$$F(\rho, \mu, H_0, y_1, y_t, V_1, g, D, w) = 0 \qquad (۱۰)$$

تعداد کمیت‌های مذکور برابر (n=9) می‌باشد. از طرفی هر سه نوع کمیت هندسی، سینماتیکی و دینامیکی در بین کمیت‌های فوق وجود دارد (m=3). درنتیجه براساس نظریهٔ π باکینگهام، ٦ پارامتر بدون بعد استخراج می‌شود. هر کمیت بی‌بعد را می‌توان به‌عنوان یک π_i فرض کرد، درنتیجه:

$$\pi_1 = \frac{y_t}{w}, \pi_2 = \frac{D}{w}, \pi_3 = \frac{y_1}{w} = C_c$$

$$\pi_4 = \frac{H_0}{w}, \pi_5 = Fr, \pi_6 = Re \qquad (۱۱)$$

پس از بررسی آنالیز ابعادی انجام‌شده و بااستفاده از ترکیب اعداد بی‌بعد به‌دست‌آمده، اعداد بی‌بعد مناسبی برای نمایش منحنی تشخیص جریان به‌دست آمد که عبارتند از $\pi_1 = \frac{y_t}{w}$ و $\pi_4 = \frac{H_0}{w}$ است که π_1 و π_4 اعداد بی‌بعد می‌باشند. هم‌چنین ین و همکاران [9]، لین و همکاران [10] و بیژن خان و همکاران [13] نیز از این اعداد بی‌بعد برای بررسی منحنی‌های تشخیص شرایط جریان آزاد و مستغرق در دریچه‌ها بهره برده‌اند.

نتایج و بحث

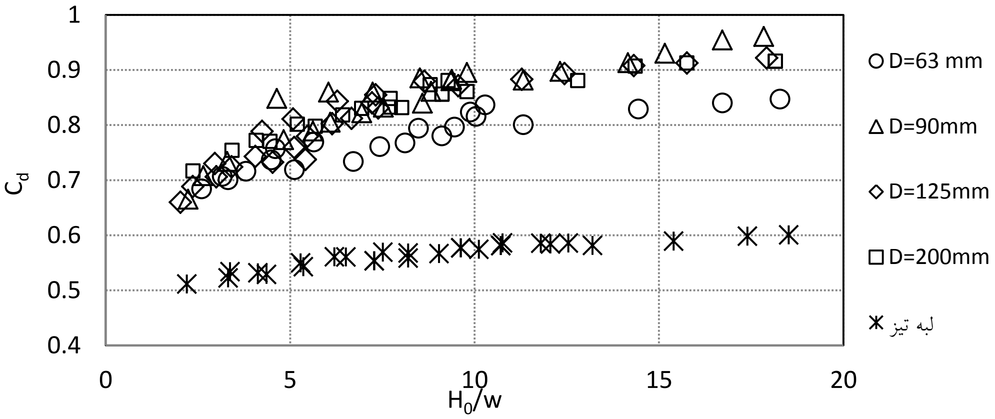
ظرفیت دبی عبوری

برای بررسی ظرفیت دبی عبوری و مقایسهٔ آن بین دریچهٔ کشویی لبه‌تیز و دریچه‌های کشویی با لبهٔ استوانه‌ای از رابطهٔ مرسوم دبی عبوری [۱۸] از دریچه‌ها استفاده شد.

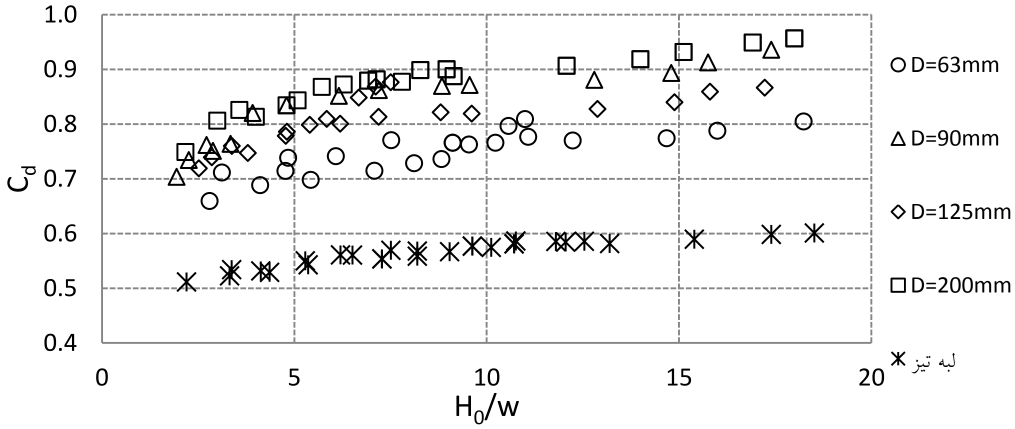
$$q = C_d w \sqrt{2gH_0} \quad (۱۲)$$

که در آن C_d ضریب دبی، q دبی در واحد عرض دریچه می‌باشد. ضریب دبی تابعی از بارآبی بالادست دریچه، بازشدگی دریچه و عمق پایاب است.

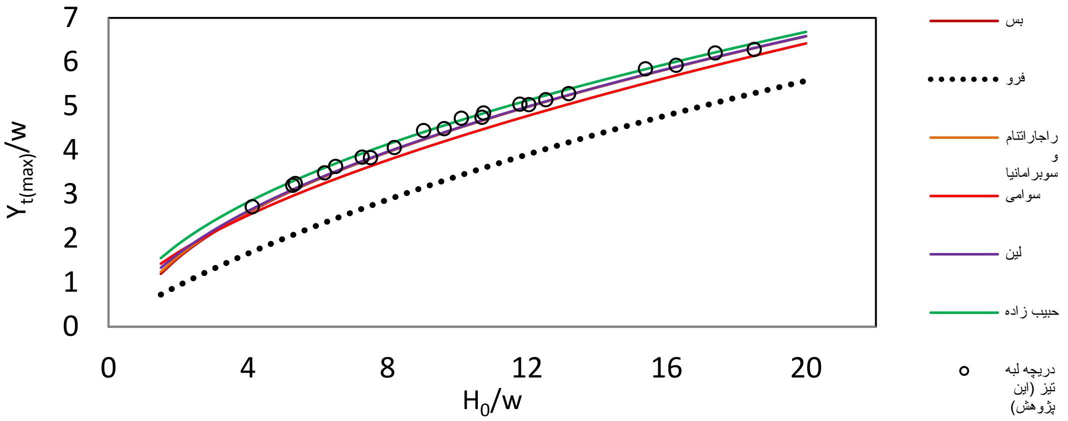
درادامه ضرایب دبی برای دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای و دریچه‌های کشویی استوانه‌ای کامل محاسبه شد و در برابر دریچهٔ کشویی لبه‌تیز ترسیم گردید. در شکل‌های (۳) و (٤) که به‌ترتیب مربوط به دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای و دریچه‌های کشویی استوانه‌ای کامل است، ضرایب دبی در مقابل نسبت بارآبی بالادست به بازشدگی دریچه نشان داده شده است. باتوجه به شکل‌های (۳) و (٤) ضریب دبی تا حداکثر برای دریچه‌های کشویی با لبهٔ نیم‌استوانه‌ای با قطرهای ٦۳، ۹۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ درمقایسه با دریچه‌های کشویی لبه‌تیز به‌ترتیب ٤۱٪ ، ٦۰٪، ۵۳٪ و ۵۱٪ افزایش یافته‌است. و برای دریچه‌های کشویی با لبهٔ استوانه‌ای کامل با قطرهای ٦۳، ۹۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ درمقایسه با دریچه‌های کشویی لبه‌تیز به‌ترتیب ۳٤٪ ، ۵٦٪، ٤۵٪ و ۵۹٪ افزایش یافته‌است.



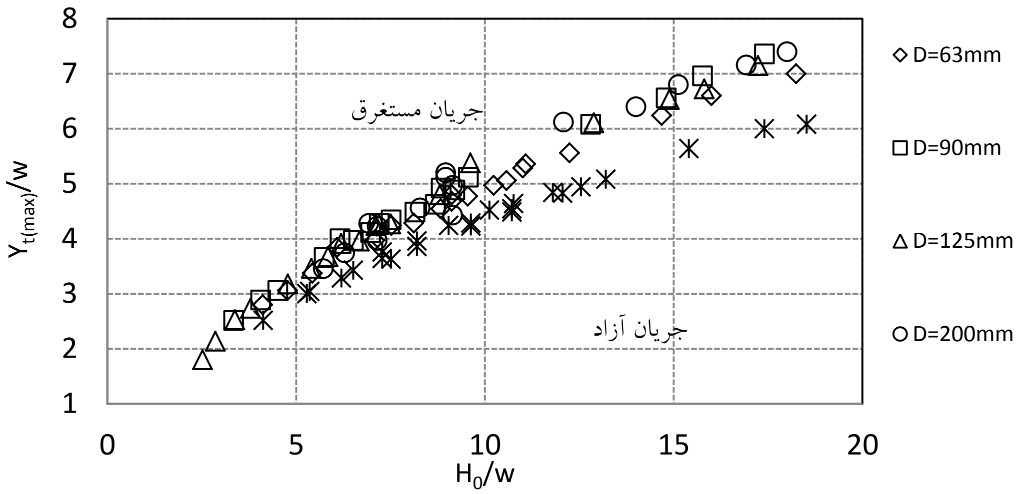
شکل ۳ تغییرات ضریب دبی در دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای و دریچهٔ لبه‌تیز در شرایط جریان آزاد



شکل ٤ تغییرات ضریب دبی در دریچه‌های کشویی استوانه‌ای کامل و دریچهٔ لبه‌تیز در شرایط جریان آزاد



شکل ۵ منحنی تشخیص جریان در دریچهٔ کشویی لبه‌تیز



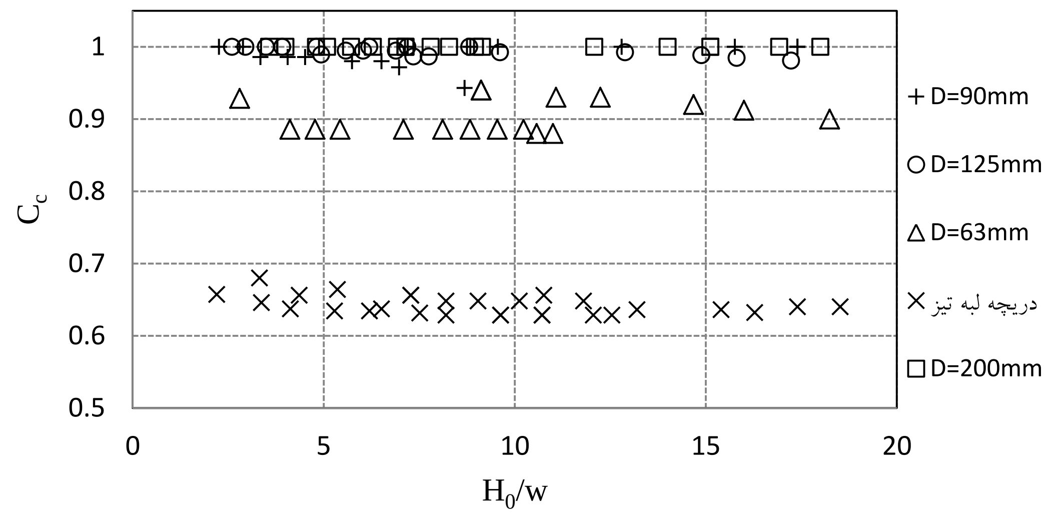
شکل ٦ مقایسهٔ منحنی شرایط جریان برای دریچه‌هایی با لبهٔ استوانه‌ای کامل و دریچهٔ لبه‌تیز

برای بررسی از صحت روش و داده‌های برداشت‌شده در آزمایشگاه، به مقایسهٔ نتایج آزمایش‌های مربوط به دریچهٔ کشویی لبه‌تیز با تحقیقات قبلی پرداخته می‌شود. در شکل (۵) منحنی‌های تشخیص شرایط جریان (آزاد یا مستغرق) با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. در این شکل منحنی‌ها برحسب نسبت بیشترین عمق پایاب به بازشدگی دریچه (محور عمودی) و نسبت بار آبی بالادست به بازشدگی دریچه (محور افقی) رسم شده‌اند. با توجه به شکل (۵)، معادلهٔ ارائه‌شده توسط فرو [15] با دیگر روابط اختلاف زیادی دارد که بیژن‌خان و کوچک‌زاده [19] دلیل این اختلاف را عدم توانایی تخمین آستانه تبدیل جریان از آزاد به مستغرق توسط معادلهٔ فرو [15] بیان نموده‌اند. به عبارت دیگر روابط فرو برای حالتی با استغراق کم قادر به تخمین دقیق دبی نیست. لازم به ذکر است که معادلهٔ فرو (معادلهٔ ۷) از ترکیب دو معادلهٔ بی‌بعد دبی–اشل برای حالات آزاد و مستغرق به‌دست آمده‌است. همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است، داده‌های آزمایشگاهی برداشت‌شده تطابق قابل قبولی با روابط ارائه‌شده دارد، درنتیجه روش و داده‌های برداشت‌شده قابل اطمینان هستند و از همین روش برای برداشت داده‌های دیگر دریچه‌های کشویی استوانه‌ای و

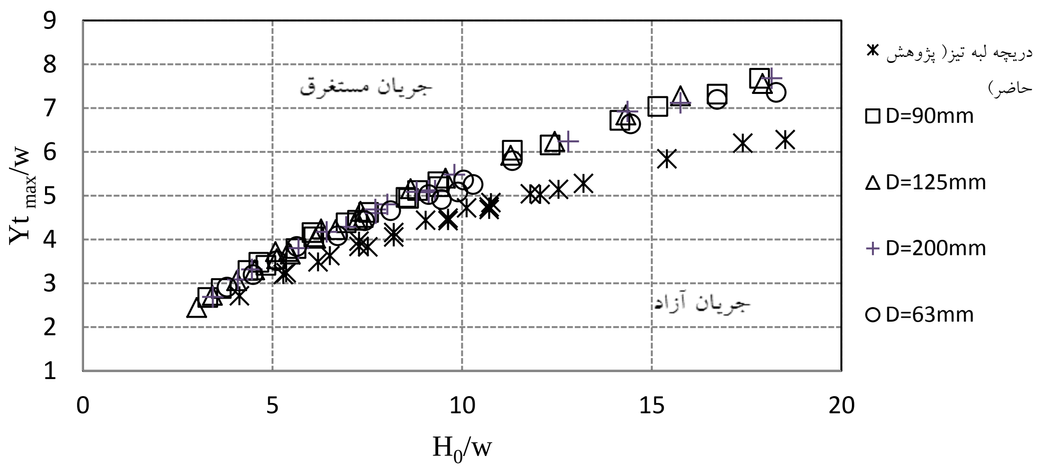
نیم‌استوانه‌ای استفاده می‌شود.

شکل (٦) منحنی تشخیص جریان را برای دریچهٔ لبه‌تیز و دریچه‌هایی با لبهٔاستوانه‌ای کامل مقایسه می‌کند. باتوجه به شکل (٦) می‌توان استنتاج نمود که دریچه‌هایی با لبهٔ استوانه‌ای کامل درمقایسه با دریچهٔ لبه‌تیز، با نسبت بارآبی به بازشدگی برابر، حتی با عمق پایاب بیشتر قادر به آزاد نگه داشتن شرایط جریان می‌باشند (به عبارت دیگر، در یک نسبت عمق پایاب به بازشدگی مشخص، با وجود این‌که جریان در دریچهٔ کشویی لبه‌تیز مستغرق است، در دریچه‌های کشویی با لبهٔ استوانه‌ای جریان آزاد برقرار است). برای دامنهٔ نسبت بار آبی بالادست دریچه به بازشدگی دریچه (H_0/W) از ٤ تا ١٨ ، نسبت ماکزیمم عمق پایاب به‌ازای جریان آزاد به بازشدگی دریچه ($Y_{t(max)}/W$) به‌ترتیب برای دریچهٔ استوانه‌ای با قطر ٦٣ میلی‌متر تا ١٦ درصد و برای دریچه‌های استوانه‌ای با قطرهای ۹۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ میلی‌متر تا ۲۲ درصد نسبت به دریچه کشویی لبه‌تیز افزایش می‌یابد. این نتیجه نشان می‌دهد که با افزایش ضریب فشردگی(شکل ۷)، عمق پایاب تا میزان مشخصی که ذکر شد افزایش می‌یابد در حالی که جریان آزاد باقی می‌ماند. شکل (۷) نشان می‌دهد که استفاده از استوانه در لبهٔ دریچه باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در میزان فشردگی جریان در زیر دریچه می‌شود و ظرفیت عبوری جریان افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان این‌طور ذکر نمود که به‌کارگیری استوانه در انتهای دریچه باعث منظم‌تر شدن خطوط جریان عبوری از دریچه شده و درنتیجه ضریب فشردگی این نوع دریچه درمقایسه با دریچهٔ لبه‌تیز افزایش قابل‌ملاحظه‌ای داشته‌است. این امر یکی از مزیت‌های دریچهٔ استوانه‌ای می‌باشد، چرا که با آزاد نگه‌داشتن شرایط جریان امکان استغراق و درنتیجه امکان افزایش بار آبی بالادست و به‌تبع سرریز شدن آب در قسمت بالادست دریچه کاهش می‌یابد.

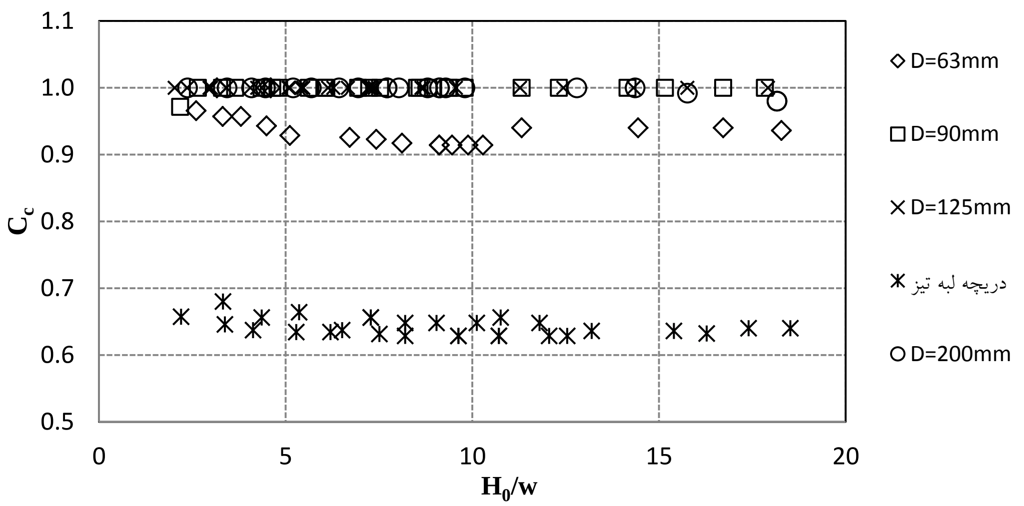
شکل‌های (۸) و (۹) به‌ترتیب منحنی تشخیص جریان و ضریب فشردگی را برای دریچه با لبهٔ نیم‌استوانه‌ای درمقایسه با دریچهٔ لبه‌تیز نشان می‌دهند. باتوجه به شکل (۸) می‌توان دریافت که همانند آن‌چه درمورد دریچه‌هایی با استوانهٔ کامل دیده‌شد، به‌کارگیری نیم‌استوانه باعث آزاد نگه داشتن بیشتر جریان پس از دریچه می‌شود. با این حال اختلاف در نتایج منحنی تشخیص جریان در دریچه‌هایی با سه نیم‌استوانه ٦٣ و ۹۰ و ۱۲۵ میلی‌متری بسیار کم است و این امر به‌دلیل اختلاف ناچیز در ضریب فشردگی این سه نوع دریچه می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۸) دیده می‌شود، برای دامنهٔ H_0/w از ٤ تا ١٨ ، $Y_{t(max)}/W$ به‌ترتیب برای دریچه‌های نیم‌استوانه‌ای ٦٣ میلی‌متر تا ١٦ درصد و برای دریچه‌های نیم‌استوانه‌ای ۹۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ میلی‌متری تا ۲۲ درصد نسبت به دریچهٔ کشویی لبه‌تیز افزایش می‌یابد. این نتیجه نشان می‌دهد که با افزایش ضریب فشردگی (کاهش میزان فشردگی جریان پس از دریچه)، عمق پایاب می‌تواند تا میزان مشخصی که ذکر شد افزایش یابد درحالی‌که جریان آزاد باقی بماند. از نظر کاربردی این امر می‌تواند منجر به عدم افزایش بارآبی در بالادست دریچه شود و درنتیجه برای کانال می‌توان از ارتفاع آزاد کمتر استفاده کرد. هم‌چنین باعث کاهش احتمال سرریز شدن آب و اتلاف آن می‌گردد. باتوجه به برابری افزایش درصدهای نسبت $Y_{t(max)}/W$ در دریچه‌های نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل با قطرهای برابر در شکل‌های (٦) و (۸)، می‌توان پی برد که فقط نیم‌استوانهٔ قرار گرفته در قسمت بالادست دریچه تأثیری بر شرایط جریان در حالت آزاد داشته‌است و این نیم‌استوانه باعث بهبود شرایط جریان شده‌است.



شکل ۷ تغییرات ضریب فشردگی دریچه‌هایی با استوانهٔ لبه‌کامل و دریچهٔ لبه‌تیز



شکل ۸ منحنی تشخیص شرایط جریان برای دریچه‌هایی با لبهٔ نیم‌استوانه و دریچهٔ لبه‌تیز



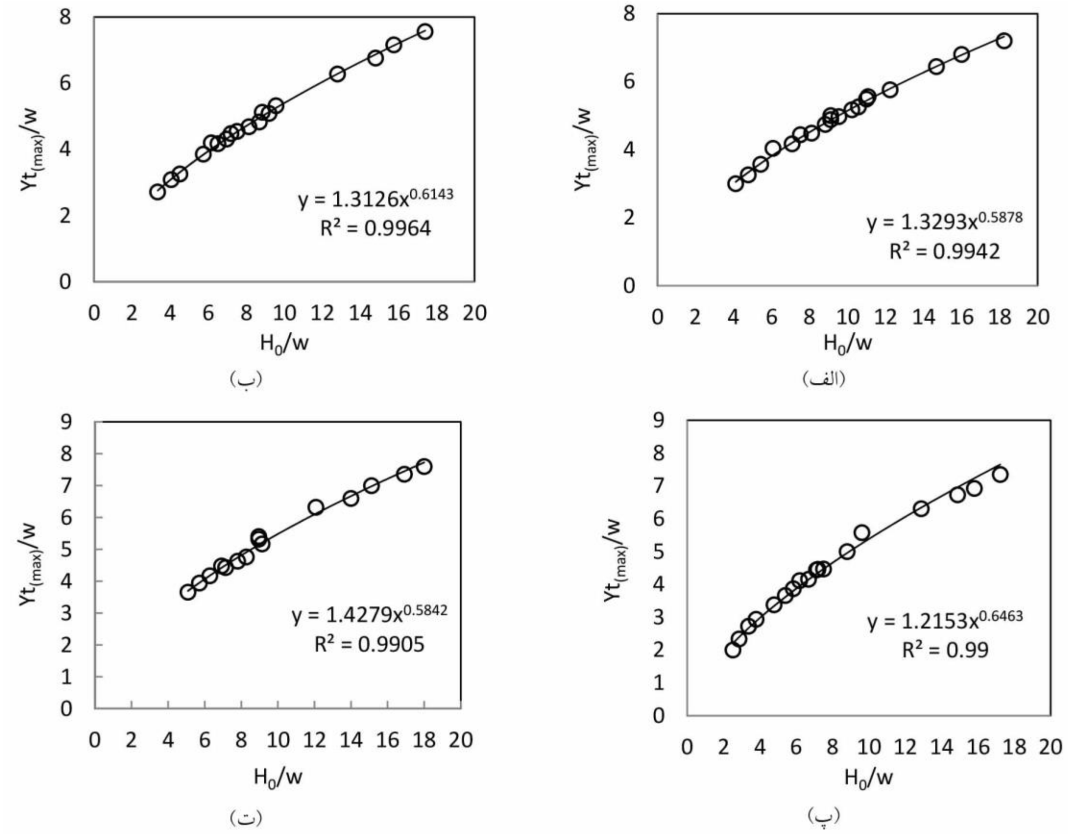
شکل ۹ تغییرات ضریب فشردگی دریچه‌هایی با لبهٔ نیم‌استوانه و دریچهٔ لبه‌تیز

همان‌طور که در شکل‌های (۶) و (۸) دیده می‌شود، از بین دریچه‌های نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل، داده‌های مربوط به دریچه با استوانهٔ با قطر ۶۳ میلی‌متر ازنظر نسبت $Y_{t(max)}/W$ ، پایین‌تر از سایردریچه‌های مشابه قرار گرفته‌است و این بدین معناست که در دریچهٔ نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل ۶۳ میلی‌متر نسبت به دیگر دریچه‌های استوانه‌ای در شرایط یکسان (نسبت بار آبی بالادست به بازشدگی یکسان) امکان تشکیل جریان مستغرق پس از این دریچه بیشتر است. این امر به‌دلیل تأثیر کمتر استوانهٔ ۶۳ میلی‌متری بر روی خطوط جریان بالادست دریچه است. می‌توان باتوجه به شکل‌های (۷) و (۹) که نشان‌دهندهٔ ضریب فشردگی کمتر دریچه‌های نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل ۶۳ میلی‌متر درمقایسه با دیگر دریچه‌های استوانه‌ای است به این امر پی برد. شکل (۱۰) وضعیت جریان عبوری از دریچهٔ کشویی نیم‌استوانهٔ ۲۰۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. عدم فشردگی پس از دریچه در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. به عبارت دیگر ضریب فشردگی تقریباً برابر با یک است. به‌دلیل ضریب فشردگی بالا در دریچه‌های کشویی با لبهٔ استوانه‌ای، در یک بازشدگی یکسان، ظرفیت دبی عبوری نیز در آنها درمقایسه با دریچهٔ کشویی لبه‌تیز بیشتر خواهد بود که یک مزیت برای دریچه‌های کشویی با لبهٔ استوانه‌ای محسوب می‌شود. به‌عبارتی می‌توان با افزایش کم در بازشدگی دریچه، ظرفیت دبی عبوری را به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.

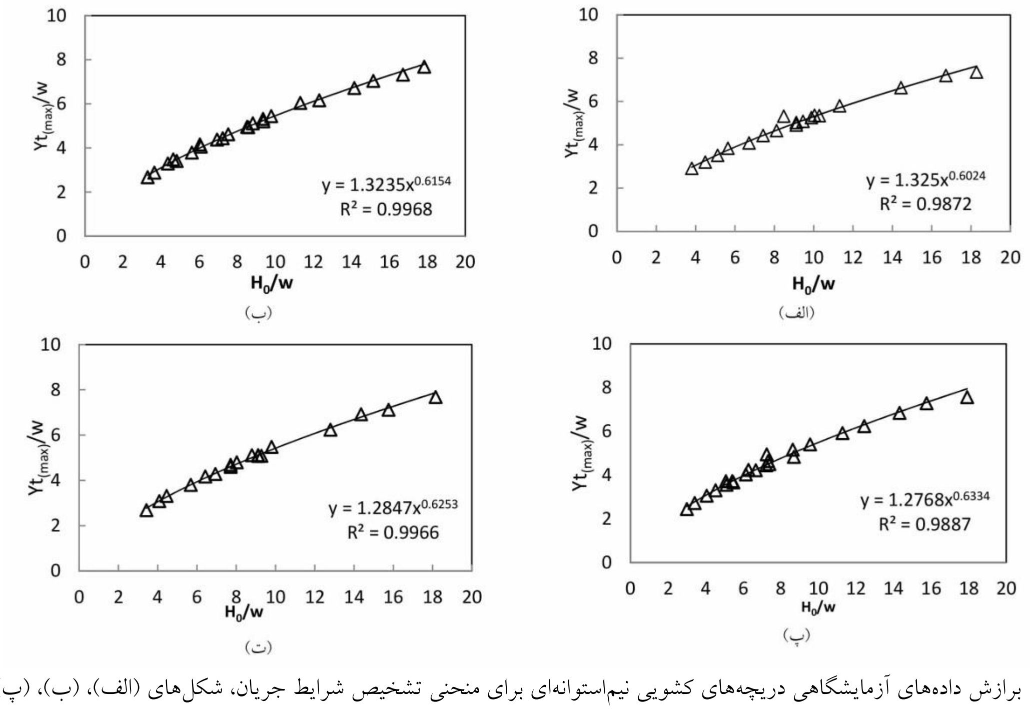
در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) برازش داده‌های آزمایشگاهی به‌منظور تعیین روابطی برای تشخیص شرایط جریان به‌ترتیب برای دریچه‌های کشویی با لبهٔ استوانه‌ای کامل و دریچه‌های کشویی با لبهٔ نیم‌استوانه در این دریچه‌ها نمایش داده شده‌است. در این شکل‌ها نماد x بیانگر پارامتر بی‌بعد H_0/w و نماد y بیانگر پارامتر بی‌بعد $Y_{t(max)}/w$ است. همان‌طور که در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) دیده می‌شود روابط برازش داده‌شده از دقت بالایی برخوردار می‌باشند و می‌توان از این روابط در تشخیص شرایط جریان و درنتیجه تعیین مقدار دبی عبوری از این نوع دریچه‌ها باتوجه به شرایط جریان و درنهایت مدیریت بهتر شبکه توزیع و انتقال آب بهره برد.



شکل ۱۰ ضریب فشردگی برابر با یک در دریچهٔ نیم‌استوانه‌ای با قطر ۲۰۰ میلی‌متر

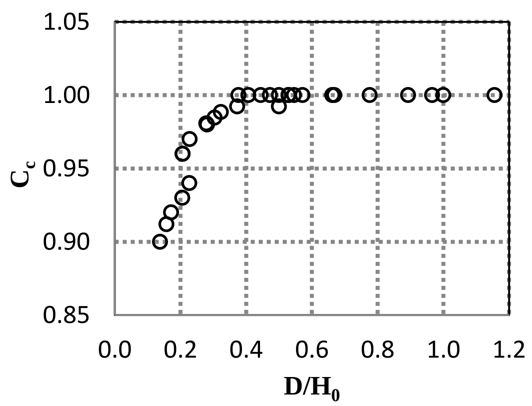


شکل ۱۱ برازش داده‌های آزمایشگاهی دریچه‌های کشویی استوانه‌ای کامل برای منحنی تشخیص شرایط جریان، شکل‌های (الف)، (ب)، (پ)، (ت) به‌ترتیب مربوط به دریچه‌های کشویی استونه‌ای کامل با قطرهای ٦٣، ٩٠، ١٢٥، ٢٠٠ میلی‌متر



شکل ۱۲ برازش داده‌های آزمایشگاهی دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای برای منحنی تشخیص شرایط جریان، شکل‌های (الف)، (ب)، (پ)، (ت) به‌ترتیب مربوط به دریچه‌های کشویی استونه‌ای کامل با قطرهای ٦٣، ٩٠، ١٢٥، ٢٠٠ میلی‌متر

شکل (١٣)، نشان‌دهندهٔ تغییرات ضریب فشردگی در دریچه‌های کشویی با لبهٔاستوانه‌ای کامل دربرابر نسبت اندازهٔ قطر به بار آبی بالادست است. در این شکل از داده‌های ٤ دریچهٔ کشویی با لبهٔ استوانه‌ای کامل با اندازه‌های ٦٣ و ٩٠ و ١٢٥و ٢٠٠ میلی‌متر در بارهای آبی بالادست مختلف استفاده شده‌است. همان‌طور که دیده می‌شود، در نسبت قطر استوانه به بار آبی بالادست (D/H_0) برابر با ٠/٤ ، تغییرات ضریب فشردگی ناچیز و تقریباً برابر با یک شده‌است. از طرفی، در D/H_0 برابر با ٠/٤ ، مقطع فشردگی پس از دریچه وجود نخواهد داشت و ظرفیت دبی عبوری به بیشترین مقدار در شرایط جریان آزاد رسیده‌است. به عبارت دیگر، برای دست یافتن به ضریب فشردگی برابر با یک می‌بایست قطر استوانهٔ به‌کاررفته در لبهٔ دریچه حداقل برابر با $0/4H_0$ باشد.



شکل ١٣ تغییرات ضریب فشردگی درمقابل نسبت اندازهٔ قطر استوانهٔ به‌کاررفته در لبهٔ دریچه به بارآبی بالادست در دریچه‌های کشویی با لبهٔ استوانه‌ای کامل

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا به بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی عبوری دریچه‌های کشویی با لبهٔ استوانه‌ای و سپس ضریب فشردگی و منحنی‌های تشخیص شرایط جریان که یکی از پارامترهای مهم مرتبط با دریچه‌های کشویی نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای کامل است، پرداخته‌شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با تغییر در شکل دریچه، ضریب فشردگی تغییر قابل‌توجهی خواهد کرد که این امر باعث تغییر در منحنی تشخیص جریان می‌شود و برای دریچه‌هایی با استوانه‌ای به قطر ٩٠ میلی‌متر و بیشتر، عملاً مقطع فشردگی بعد از دریچه وجود نخواهد داشت، لذا ضریب فشردگی برابر با یک است. در شرایط یکسان آزمایش، دریچه‌ای که باعث افزایش بیشتر ضریب فشردگی شده‌است، عمق پایاب بیشتری را می‌تواند تحمل کند، در حالی که جریان پس از دریچه آزاد است. این وضعیت یک مزیت مهم برای این‌گونه دریچه‌ها محسوب می‌شود چرا که با جلوگیری از استغراق جریان باعث جلوگیری از افزایش بار آبی بالادست می‌شود و امکان سرریز شدن در قسمت بالادست دریچه کاهش می‌یابد که این امر باعث جلوگیری از اتلاف آب می‌شود. روابطی با دقت بالایی برای تشخیص شرایط جریان در دریچه‌های مورد آزمایش در این پژوهش با برازش بر داده‌های آزمایشگاهی ارائه شد. درنهایت نیز با بررسی داده‌های آزمایشگاهی معلوم شد برای دست‌یابی به ضریب فشردگی برابر با یک، حداقل قطر استوانهٔ به‌کاررفته در لبهٔ دریچه می‌بایست برابر ٠/٤ بار آبی بالادست دریچه ($0/4\ H_0$) باشد. باتوجه به نتایج گرفته‌شده می‌توان با تغییر اندک در ساختار دریچهٔ کشویی باعث افزایش عملکرد هیدرولیکی آن شد.

مراجع

1. Henderson, F. M., "Open Channel Flow", Macmillan Publishing Co., New York, (1966).

2. Rajaratnam, N., and Subramanya, K., "Flow Equation for the Sluice Gate", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* Vol. 93(3), pp.167-186, (1967).
3. Belaud, G., and Cassan, L., and Baume, J.P., "Calculation of Contraction Coefficient under Sluice Gates and Application to Discharge Measurement", *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 135(12), pp.1086-1091, (2009).
4. Montes, J.S., "Irrotational Flow and Real Fluid Effects under Planar Sluice Gates", *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 123(3), pp. 219-232, (1997).
5. Tel, J., "Discharge Relations for Radial Gates", Master of Science Thesis, Delft Technical University, Delft, The Netherlands (2000).

۶. محمدی، م. ح.، و بیرامی، م. ک.، «تخمین دبی جریان از زیر دریچه‌های کشویی و قطاعی با جریـان آزاد». نشـریهٔ آب و فاضـلاب (۲)، صص. ۹۴-۱۰۱، (۱۳۸۹).

7. Bos, M.G., "Discharge Measurement Structures", Wageningen, the Netherlands, ILRI, (1989).
8. Swamee, PK., "Sluice-gate Discharge Equations", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* Vol. 118(1), pp. 56-60, (1992).
9. Yen, J.F., and Lin, C.H., and Tsai, C.T., "Hydraulic Characteristics and Discharge Control of Sluice Gates", *Journal of the Chinese institute of engineers,* Vol. 24(3), pp. 301-310, (2001).
10. Lin, CH., Yen, J.F., Tsai, CT., "Influence of Sluice Gate Contraction Coefficient on Distinguishing Condition", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* Vol. 128(4), pp.249-252, (2002).
11. Wahl, T.L., Clemmens, A.J., "Applying the Energy–Momentum Method to Radial Gate Discharge Calibration", In World Water & Environmental Resources Congress. Alaska, pp. 1-10, (2005).
12. Buyalski, C.P., "Discharge Algorithms for Canal Radial Gates", Technical Report REC-ERC-83-9. U.S. Bureau of Reclamation, Denver, (1983).
13. Bijankhan, M., Kouchakzadeh, S., Bayat, E., "Distinguishing Condition Curve for Radial Gates", Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 22(5), pp. 500-506, (2011).
14. Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., and Replogle, J.A., "Calibration of Submerged Radial Gates", *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 129(9), pp.680-687, (2003).
15. Ferro, V., "Simultaneous Flow over and under a Gate", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* Vol. 126(3), pp.190-193, (2000).
16. Ansar, M., "Discussion of ‘Simultaneous Flow over and under a Gate" by V. Ferro. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* Vol. 127(5), pp.325-326, (2001).
17. Habibzadeh, A., Vatankhah, A., and Rajaratnam, N., "Role of Energy Loss on Discharge Characteristics of Sluice Gates", *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 137(9), pp.1079-1084, (2011).

۱۸. ابریشمی،ج و حسینی،س.م.، «هیدرولیک کانال های باز»، مؤسسهٔ چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، (۱۳۷۵).

19. Bijankhan, M., and Kouchakzadeh, S., "Discussion of Benchmark of Discharge Calibration Methods for Submerged Sluice Gates", by Carlos Sepúlveda, Manuel Gómez, and José Rodellar, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 137(1), pp. 56-57, (2011).